

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (E_{T_0}) EN COLOMBIA: DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL, VARIABILIDAD INTERANUAL Y AFECTACIÓN POR EL FENÓMENO EL NIÑO-OSCILACIÓN SUR (ENOS)

**Gonzalo Hurtado Moreno
Martha Cecilia Cadena**

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

SUBDIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	4
1. OBJETIVO	4
2. METODOLOGÍA	4
3. CLIMATOLOGÍA DE LA ET₀ EN COLOMBIA (ACTUALIZACIÓN)	5
3.1 MARCHA ANUAL DE LA ET ₀	6
3.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA ET ₀ EN COLOMBIA	8
2. VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA ET₀	13
2.1 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LAS ANOMALÍAS MENSUALES DE ET ₀	13
2.2 VALORES EXTREMOS DE LAS ANOMALÍAS DE ET ₀	16
3. RELACIÓN ENTRE LOS EVENTOS ENOS (EL NIÑO-OSCILACIÓN SU) Y LOS VALORES MENSUALES DE LA ET₀	22
3.1 METODOLOGÍA	22
3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
3.2.1 EVENTO EL NIÑO 1991/92	24
3.2.2 EVENTO EL NIÑO 2009/10	24
3.2.3 EVENTO EL NIÑO 2015/16	25
3.2.4 EVENTO LA NIÑA 1999/2000.....	26
3.2.5 EVENTO LA NIÑA 2007/08.....	27
3.2.6 EVENTO LA NIÑA 2010/11.....	28
4. CONCLUSIONES	28
4.1 CONCLUSIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO CLIMATOLÓGICO DE LA ETO EN COLOMBIA	28
4.2 CONCLUSIONES AL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA ETO	29
4.3 CONCLUSIONES AL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS FENÓMENOS EL NIÑO/LANIÑA EN LA ETO	29
Bibliografía	30

TABLAS E ILUSTRACIONES

GRAFICO 1. Marcha anual de la ETo (a)	6
GRAFICO 2. Marcha anual de la ETo (b)	¡Error! Marcador no definido.
GRAFICO 3. Variabilidad interanual de las anomalías de ETo (a).....	14
GRAFICO 4. Variabilidad interanual de las anomalías de ETo (b).....	15
GRAFICO 5. Valores extremos de las anomalías de ETo (a)	17
GRAFICO 6. Valores extremos de las anomalías de ETo (b)	18
GRAFICO 7. Anomalías de ETo (Periodo El Niño 91/92).....	24
GRAFICO 8. El Niño 2009/10	25
GRAFICO 9. El Niño 2015/16	26
GRAFICO 10. La Niña 1999/2000.....	27
GRAFICO 11. La Niña 2007/2008.....	27
GRAFICO 12. La Niña 2010/11.....	28
FIGURA 1. Mapa anual de la ETo.....	9
FIGURA 2. Mapas mensuales de la ETo (ENE-DIC)	12
Tabla 1. Desviación estándar y coeficiente de variación de la ETo (1981-2016)	19
Tabla 2. Estaciones de referencia.....	23

INTRODUCCIÓN

Este documento tiene como objetivo principal la actualización de la climatología de la Evapotranspiración de referencia (ET_o) para Colombia, analizando la variabilidad interanual para estaciones representativas por región; así como establecer posibles efectos de los fenómenos El Niño-Oscilación Sur (ENOS) sobre el comportamiento de la variable.

Inicialmente se hace un resumen descriptivo del comportamiento espacio-temporal de la ET_o, complementario a la Nota Técnica previa (Gómez & Cadena, 2017), donde se había establecido una metodología para la validación del cálculo de la ET_o en Colombia a partir de registro de estaciones del país y de una rutina informática desarrollada para tal fin, denominada “Evapotrans”. Continuando con los avances, se elaboraron los mapas de la distribución espacial de la ET_o en la escala anual, mensual y decadiaria, con gráficos del comportamiento interanual para diferentes localidades representativas.

Finalmente se obtuvieron gráficos y mapas de la distribución espacial y temporal de la ET_o y se hicieron análisis sencillos de tendencias de las series históricas y su posible relación con la ocurrencia de eventos ENOS en años representativos.

1. OBJETIVO

Actualizar la climatología de la ET_o en Colombia, con el análisis de la variabilidad interanual para estaciones de referencia y posibles efectos de los fenómenos ENOS, en el comportamiento de la variable.

2. METODOLOGÍA

- ***Análisis de la variabilidad interanual, para estaciones de referencia y actualización de la climatología de la ET_o en Colombia.***

Basados en los resultados obtenidos a partir del aplicativo “Evapotrans”, se construyeron gráficos de variación interanual de la ET_o, se hicieron análisis de tendencias y se analizaron las anomalías extremas en la escala mensual; con el objeto de parametrizar los resultados, se calcularon indicadores como la desviación estándar y el coeficiente de variación mes a mes, para puntos representativos. Finalmente se elaboraron los mapas del comportamiento intranual para estaciones representativas de las diferentes regiones del país.

- ***Posibles efectos de los fenómenos ENOS en el comportamiento de la variable.***

Utilizando las series históricas de la ET_o calculada por el método FAO-Penman-Monteith, se buscó la posible relación entre la variable y la ocurrencia del fenómeno ENOS, para la serie histórica 1981-2016; para lo cual, se tomaron tres eventos con gran incidencia en las condiciones atmosféricas del país:

El Niño: 1991/92 - 2009/2010 y 2015/16 y

La Niña: 1999/00 – 2007/08 y 2010/11

3. CLIMATOLOGÍA DE LA ETo EN COLOMBIA (ACTUALIZACIÓN)

Este documento pretende ampliar los resultados obtenidos con anterioridad por (Gómez & Cadena, 2017), en los que se hicieron cálculos de (ETo) por diferentes fórmulas empíricas en la escala mensual, como: Turc, Thornthwaite, Christiansen, Linacre, Blaney & Criddle, Hargreaves y FAO-Penman-Monteith, validando los cálculos por medio de mediciones del tanque evaporímetro, concluyendo que: “El método que mejor se ajustó a las condiciones de Colombia resultó ser el propuesto por Penman-Monteith, calculado según procedimiento recomendado por la FAO.” En ese sentido, el análisis que se hizo de la climatología, partió de la tabla de cálculo obtenida en el estudio mencionado.

La Evapotranspiración potencial (ETP), es un proceso combinado que comprende la evaporación de todos los tipos de superficies (vegetal - suelo - lámina de agua) y la transpiración de las plantas.

La evapotranspiración de referencia (ETo), es la evapotranspiración desde un cultivo de referencia.

Este concepto, introducido por Thornthwaite a mediados del siglo XX, constituye, junto con la precipitación, un componente fundamental del balance hídrico agrícola del suelo y por tanto su conocimiento permite establecer, los volúmenes de agua que pueden ser aprovechados o requieren ser suministrados al suelo en las labores agrícolas. Por otra parte, también interviene en el balance hidrológico, el cual permite conocer flujos, en cuerpos de agua de diferentes características.

Los estudios hechos anteriormente en este tema, en Colombia y en otros países, (FAO NO.56, 2006), (Hurtado, 2000), (Baldión, 1985), (Penman, 1948) hacen referencia únicamente a las variaciones intranuales de la ETo. En esta oportunidad, se abordó el análisis de la distribución interanual y su posible relación con eventos ENOS.

Los resultados obtenidos de los análisis de la climatología de la ETo para Colombia, basados en los cálculos hechos por la fórmula FAO-Penman-Monteith, son los siguientes:

- Los mayores valores de ETo se presentan al norte de la Región Caribe, sobre la Región de la Orinoquia y en sectores de los valles interandinos. Los menores valores se registran en elevaciones superiores a los 2000 metros de altura sobre el nivel del mar.
- En zonas pertenecientes al trópico húmedo, los valores de ETo son comparativamente menores a los valores que se presentan en el Caribe tropical, bajo similares condiciones topográficas y de temperatura.
- A pesar de la escasez de información en la Región Andina, se encontró una relación razonable entre la ETo y la elevación, lo cual permitió estimar la distribución territorial de la variable, en áreas no instrumentadas; con esta información estimada, se pudieron elaborar mapas y describir con mayor claridad el comportamiento de la variable en esta región del país, que posee un relieve montañoso.

3.1 MARCHA ANUAL DE LA ETo

Es evidente que la ETo depende básicamente de variables como las condiciones térmicas y de humedad imperantes en una localidad específica; este hecho se refleja en su distribución durante el año. Generalmente los máximos valores se presentan en épocas secas, mientras en períodos de mayores lluvias, descienden hasta alcanzar los rangos más bajos durante el año.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, la amplitud anual (diferencia entre el mes con mayor promedio diario y el mes con menor promedio), no supera los dos milímetros. Las mayores diferencias se dan en las localidades más calurosas y secas (Riohacha, Cúcuta) y las menores amplitudes se registran en las regiones de trópico húmedo (Barrancabermeja, Quibdó) y también en lugares altos de las cordilleras, como la Sabana de Bogotá.

En el GRAFICO 1 y 2 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta el comportamiento intranual de la ETo a lo largo del año.

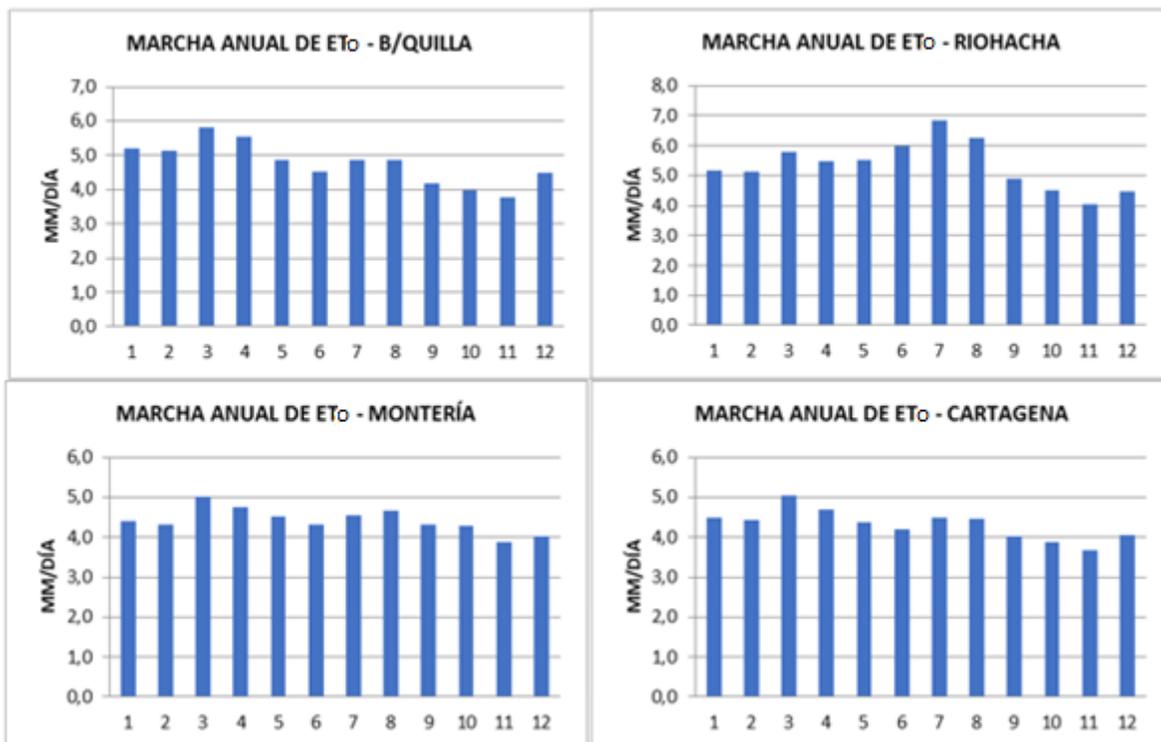
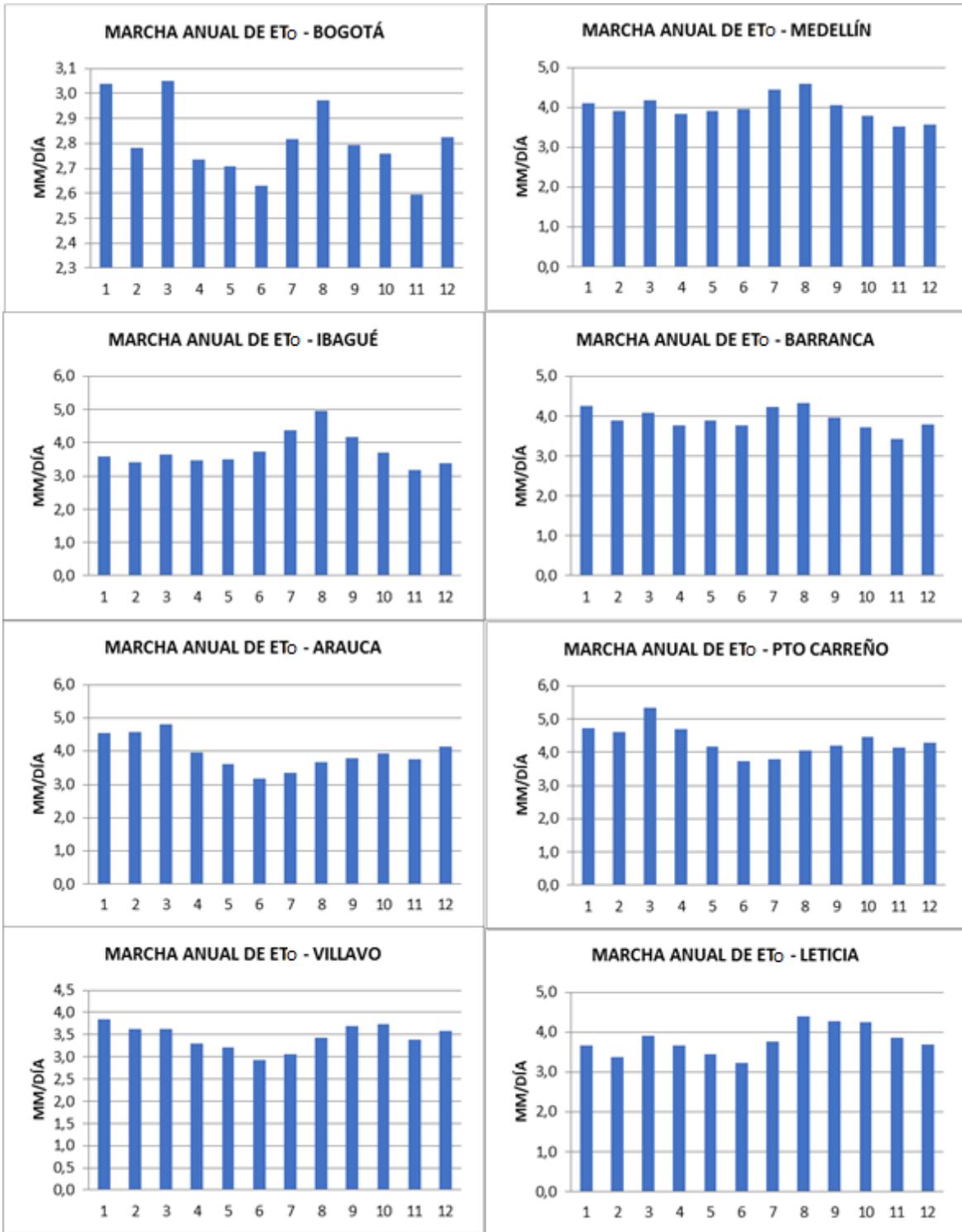


GRAFICO 1. Marcha anual de la ETo (a)



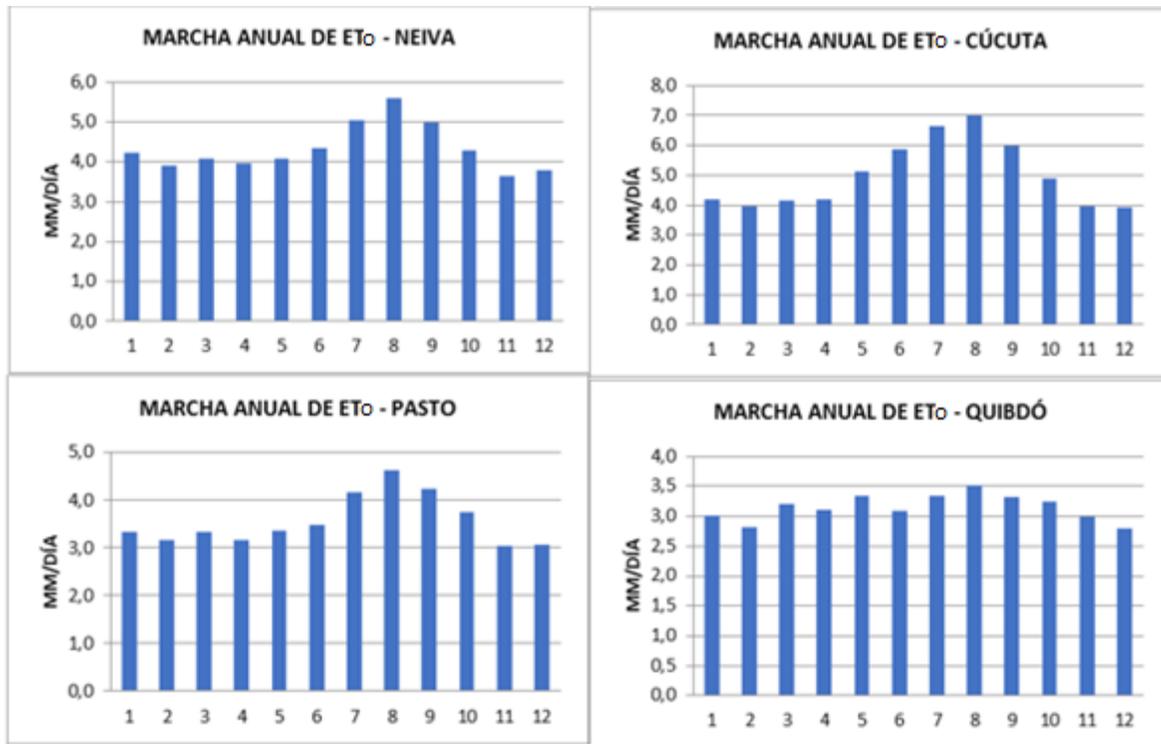


GRAFICO 2. Marcha anual de la ETo (b)

3.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA ETo EN COLOMBIA

Como se observa en los mapas de la distribución espacial de la variable, en la escala anual, mensual y decadiaria, el comportamiento anual de la evapotranspiración de referencia, sigue un patrón más o menos definido por región:

- Región Caribe: 1400 a 2000 mm/año.
- Orinoquia: 1200 a 1600 mm/año.
- Región Pacífica: 1000 a 1200 mm/año.
- Amazonia: 1000 a 1200 mm/año.
- Región Andina: Desde 800 mm en las mayores elevaciones, hasta 1200 mm en estribaciones bajas.

De acuerdo con los mapas de distribución mensual (FIGURA 2 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), la localización de los núcleos con valores máximos y mínimos, se conserva en términos generales en las mismas zonas a lo largo del país, con algunas excepciones, que se presentan en zonas con presencia de periodos lluviosos muy intensos, en donde las precipitaciones constantes inciden sobre la disminución de los valores de ETo.

Por ejemplo, la ocurrencia de la intensa temporada lluviosa en la Orinoquia durante el periodo mayo, junio y julio, ocasiona una disminución brusca en los niveles de evapotranspiración, a pesar de las altas temperaturas imperantes en estas regiones. Una situación similar se presenta en las regiones Pacífica y Amazonia, con la diferencia de que los valores conservan durante casi todo el año rangos similares, como ya se discutió en el párrafo correspondiente a la marcha anual.

Los mapas fueron realizados con el software Arc-Gis, aplicando el método sencillo de interpolación IDW. Para la región Andina y con el fin de suplir de alguna forma, la escasez de puntos de medición directa, se calculó una ecuación de correlación entre la elevación y la ETo, en combinación con las mediciones directas, como factores de ajuste. El resultado fue un mayor detalle en las estribaciones de las cordilleras y la generación de núcleos con valores dentro de los rangos razonables en localidades por encima de los 2000 msnm, en los cuales no existe mayor cobertura de estaciones.

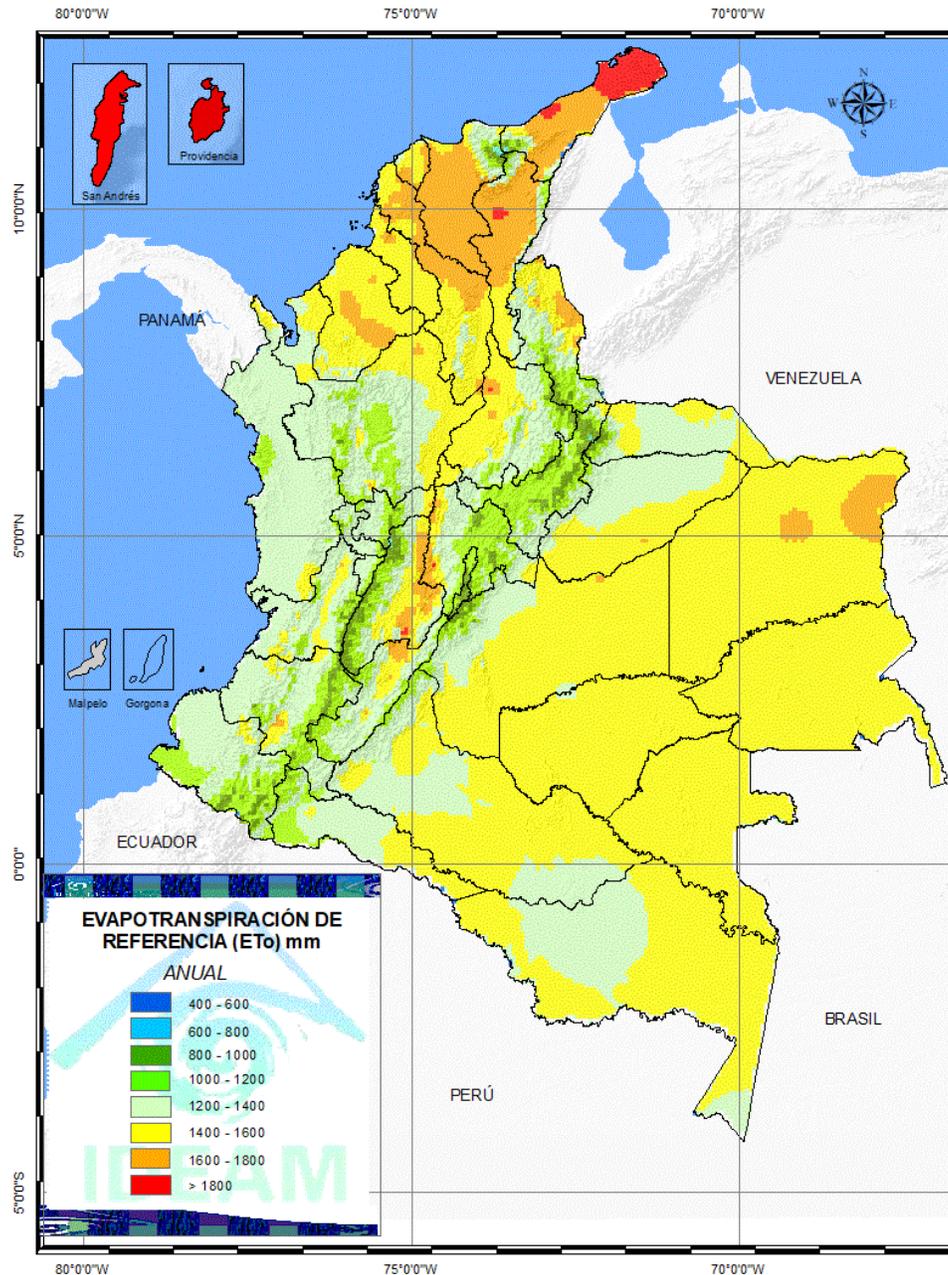
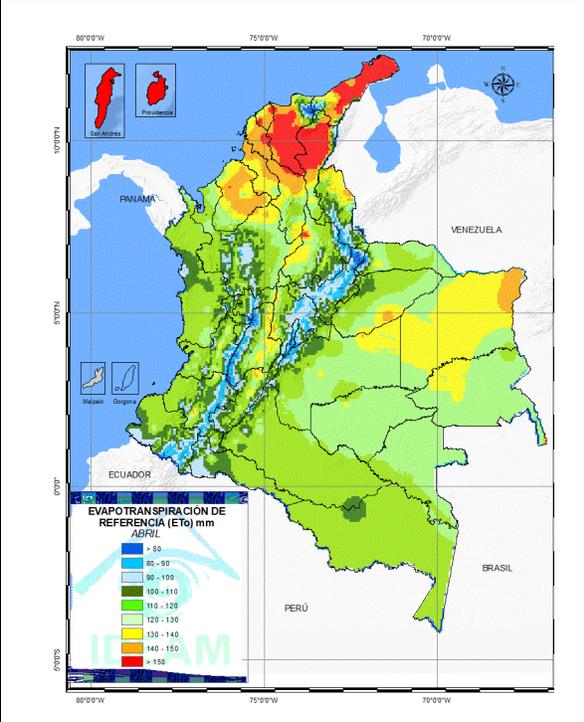
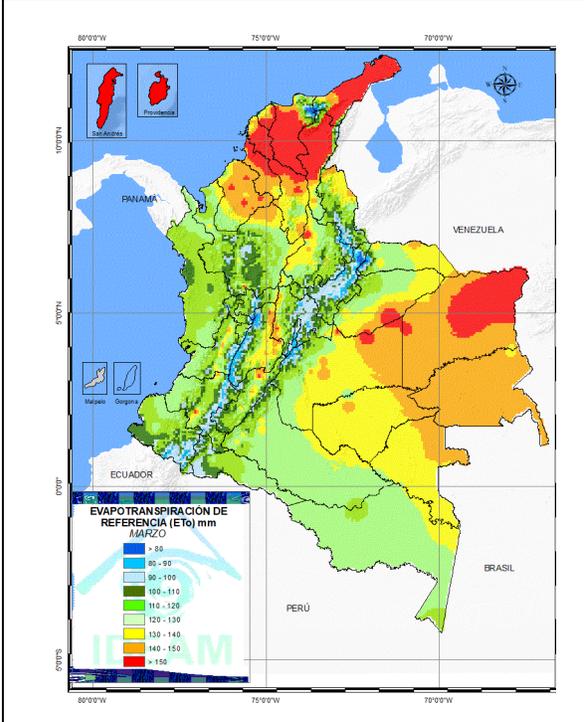
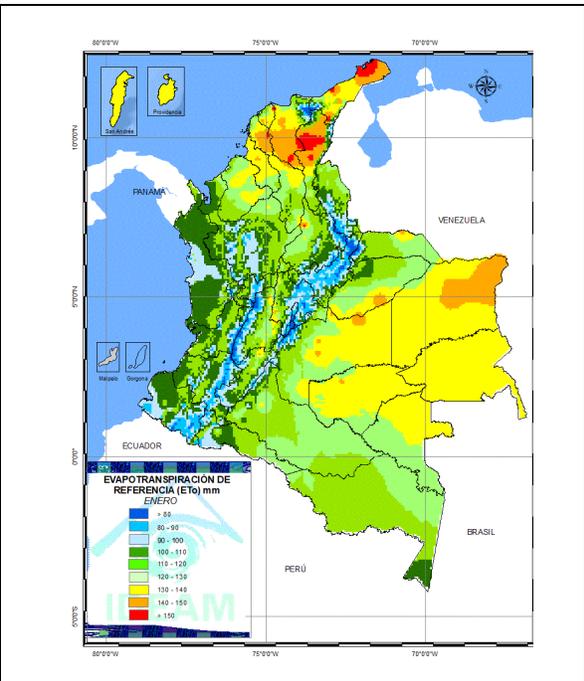
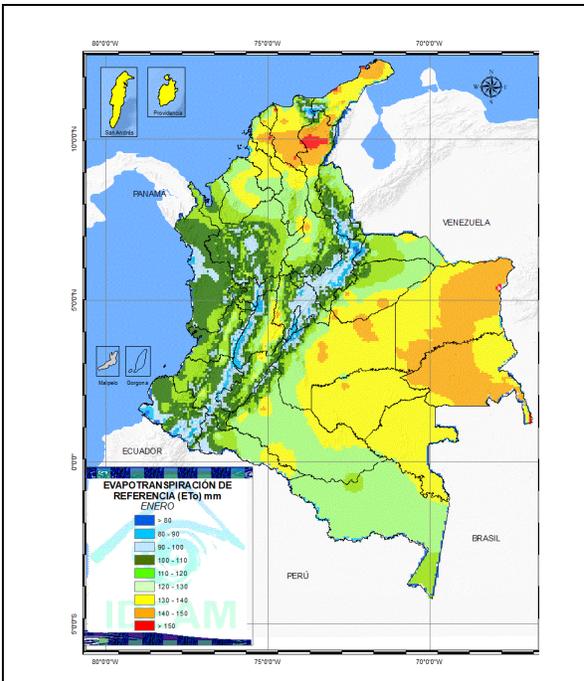
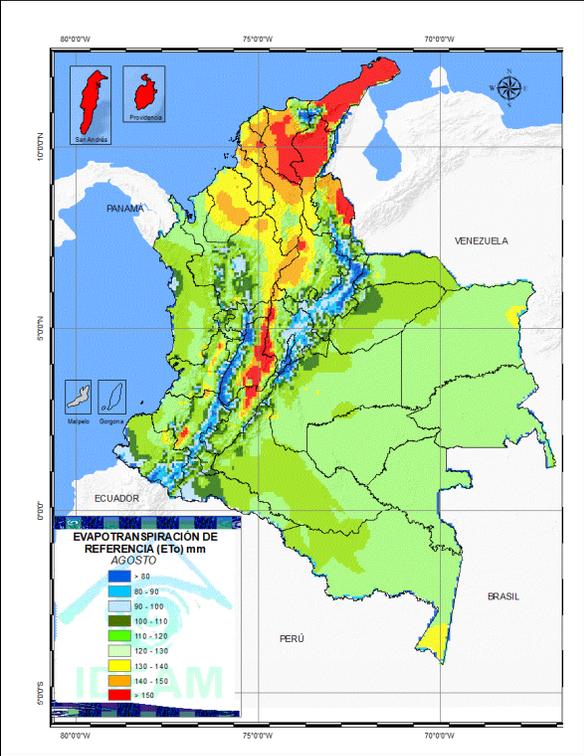
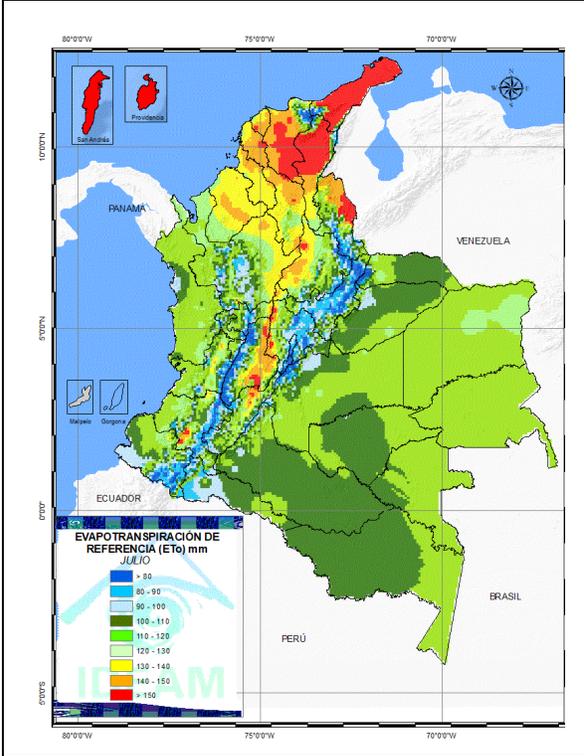
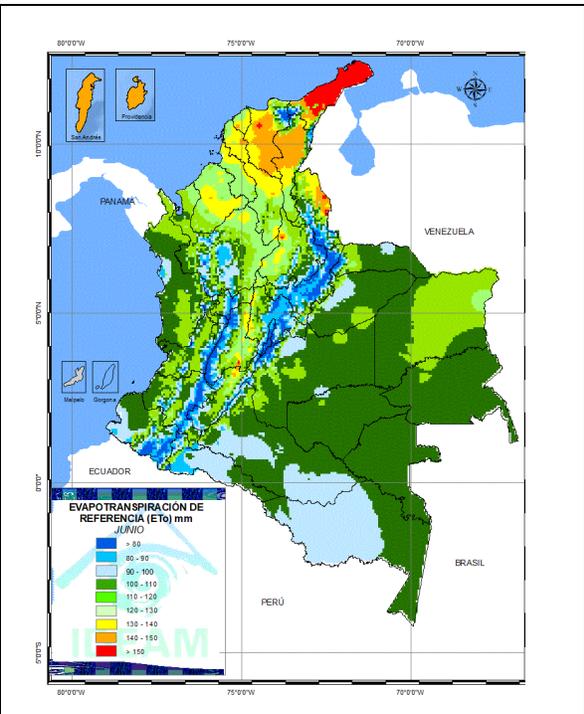
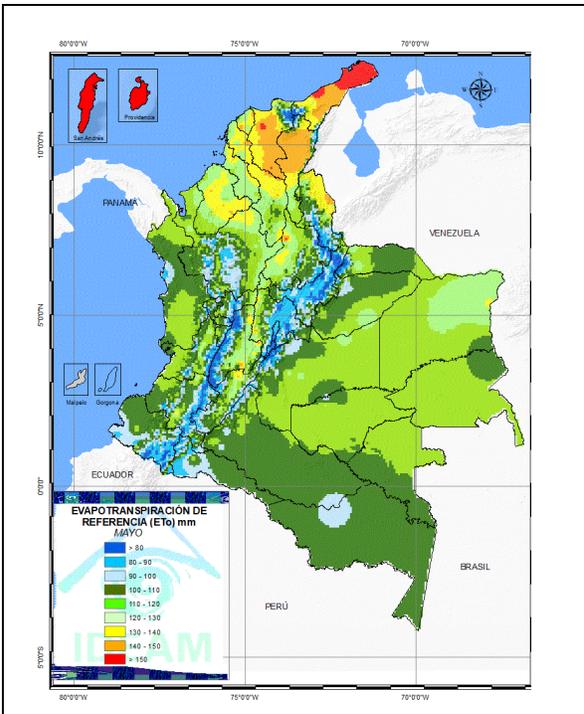


FIGURA 1. Mapa anual de la ETo





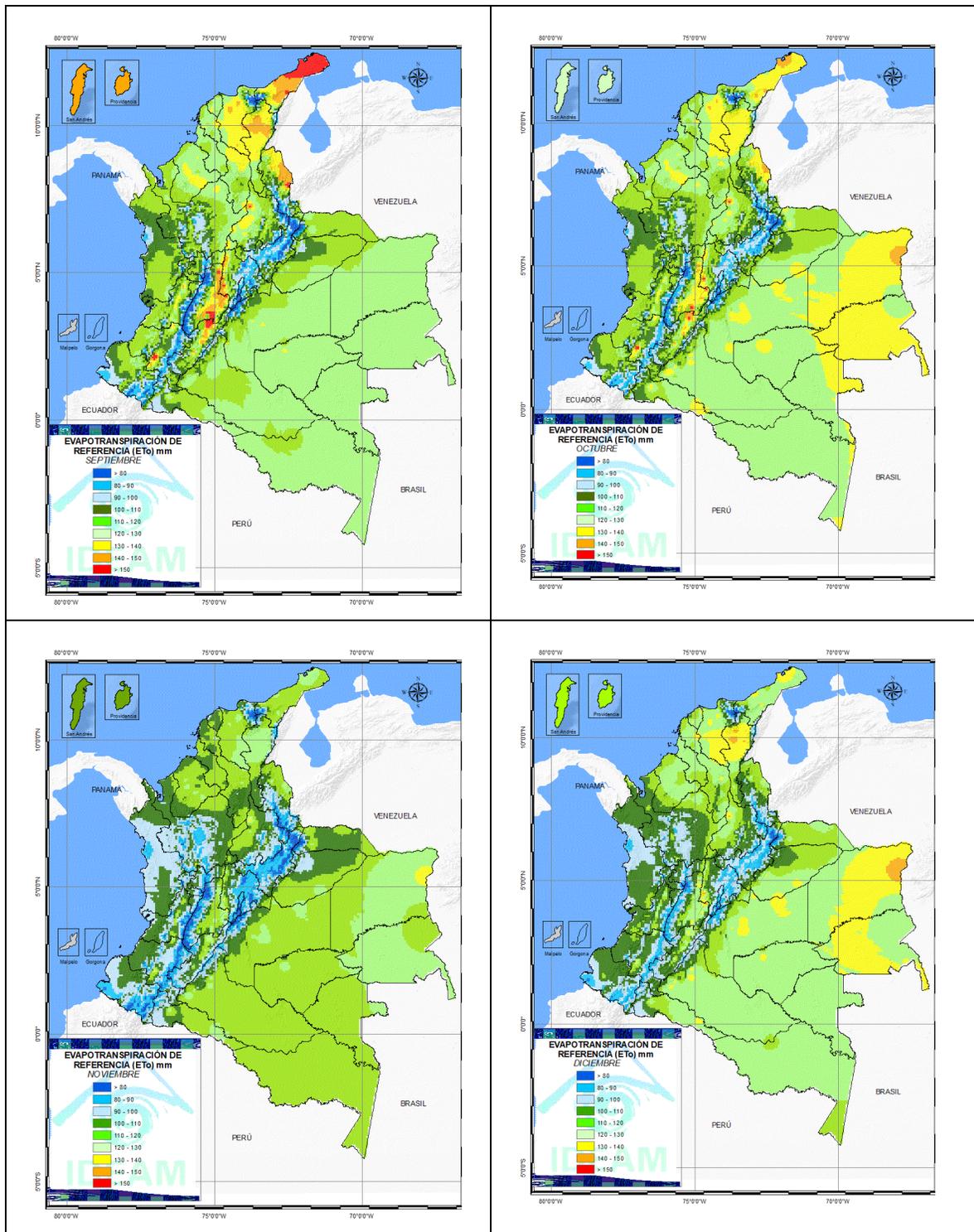


FIGURA 2. Mapas mensuales de la Eto (ENE-DIC)

2. VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA ETo

El aplicativo “Evapotrans”, desarrollado en la fase anterior, permitió calcular año por año los valores de ETo según el método seleccionado. Este hecho constituyó un significativo avance, ya que, en análisis anteriores, solo se contaba con valores de ETo calculados a partir de promedios multianuales de las variables requeridas en la metodología. Es decir, que solo se disponía de un único valor de ETo para el mes o la década seleccionada, pero se desconocía lo que sucedía en un año particular.

Aprovechando la nueva herramienta, se analizó el comportamiento histórico de la ETo; para lo cual, se seleccionaron estaciones representativas con información confiable de ETo y se analizó su variabilidad interanual, los rangos extremos que presentaban las anomalías durante el período estudiado y por último la respuesta de la ETo a eventos climáticos que pudieran influir en su comportamiento, como el fenómeno ENOS.

Adicionalmente se analizó el comportamiento histórico de la ETo y las tendencias de largo plazo, para ello se seleccionaron las series históricas más confiables por su periodo de registro y representatividad. Es preciso advertir que en general, la calidad de los datos no es óptima, ya que las series presentan discontinuidades y en ocasiones, cambios bruscos difíciles de verificar y explicar. Por ello se decidió trabajar las series a partir de las anomalías respecto al promedio del período, lo cual permite simultáneamente establecer la magnitud de los cambios. Revisada la información en su conjunto, se evidenciaron cambios y tendencias ajustados a lo que razonablemente podría esperarse. Finalmente, se revisó la significancia de los cambios interanuales y se estableció la necesidad de calcular la ETo en tiempo real y hasta qué punto sería posible trabajar simplemente con promedios multianuales.

2.1 VARIABILIDAD INTERANUAL DE LAS ANOMALÍAS MENSUALES DE ETo

En el GRAFICO 2 y GRAFICO 3, aparecen las anomalías de las series históricas.

En general puede afirmarse que la magnitud de las anomalías es mayor en los climas cálidos y secos, en comparación con los climas medios y fríos húmedos de la región Andina. En los primeros, es posible registrar anomalías de 30 a 50 mm/mes, mientras en lugares altos de la región Andina como Bogotá, las anomalías son menores a 20 mm/mes.

En cuanto a las tendencias de largo plazo, en la mayoría de los casos no se evidencian valores estadísticamente significativos. Al norte de la región Caribe, se aprecia una leve tendencia negativa, mientras en el centro del país se registra estabilidad en los valores a lo largo de la serie histórica.

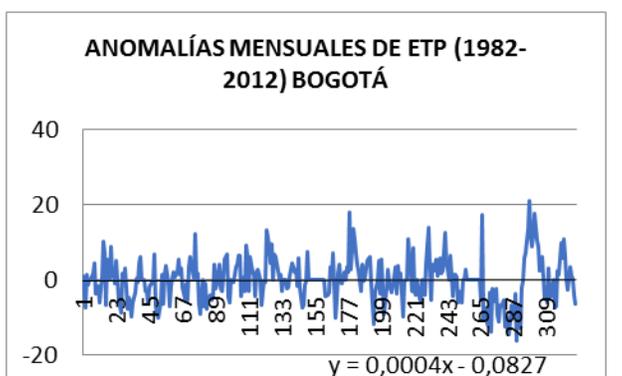
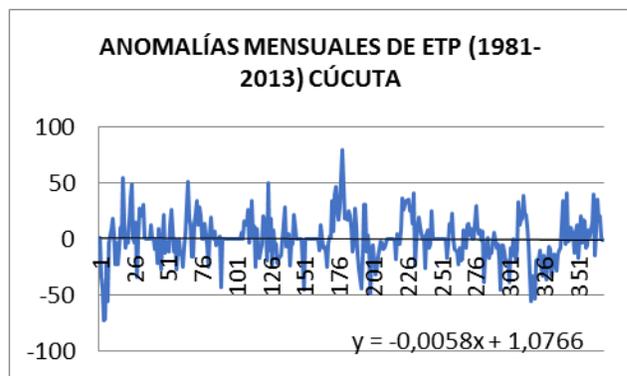
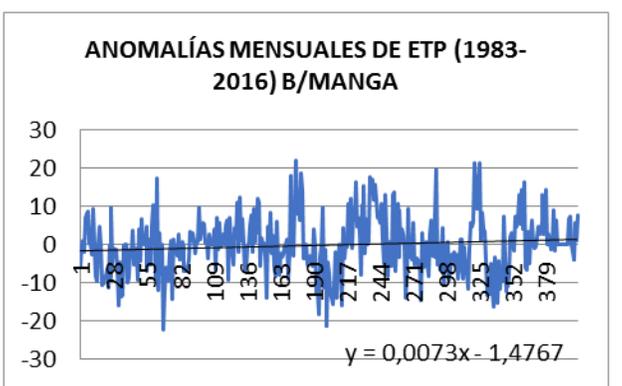
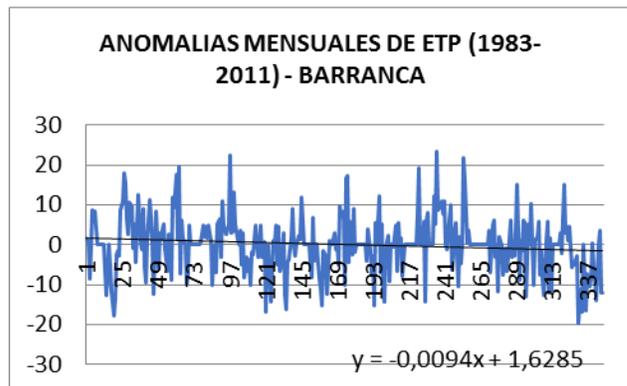
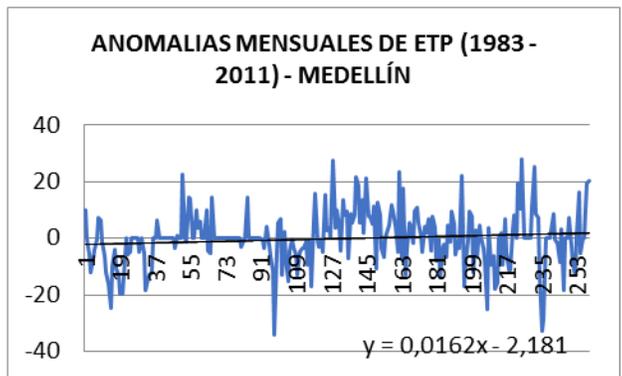
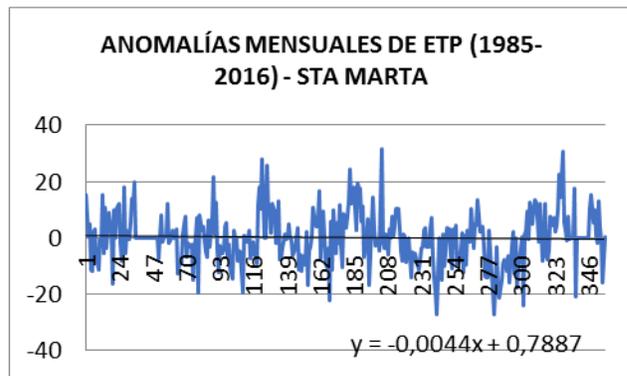
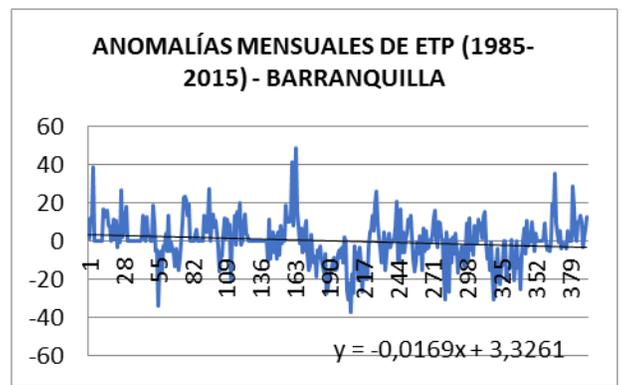
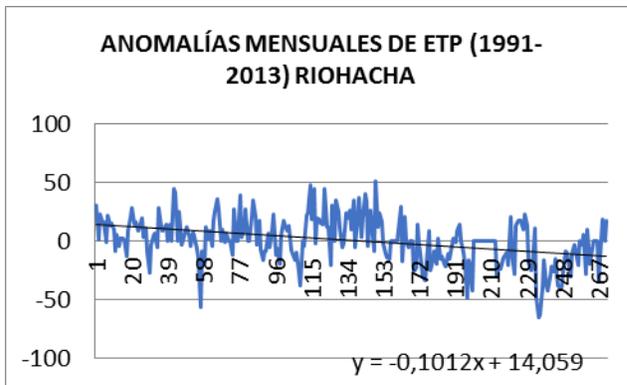


GRAFICO 2. Variabilidad interanual de las anomalías de ETo (a)

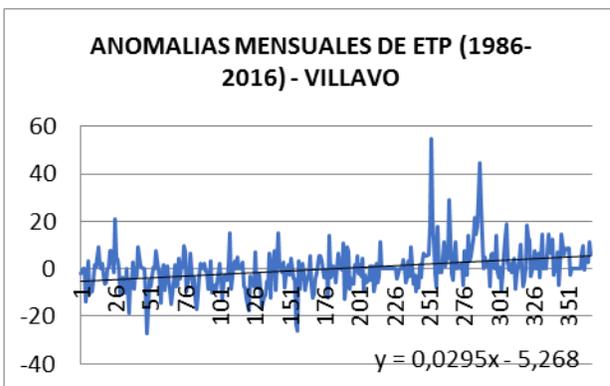
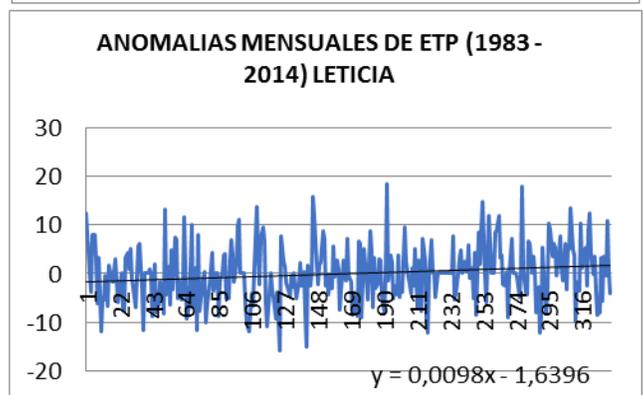
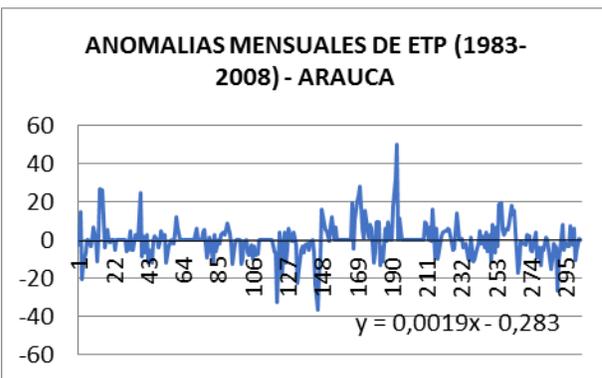
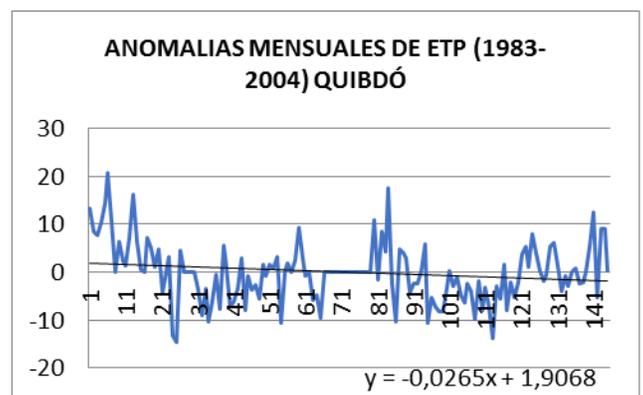
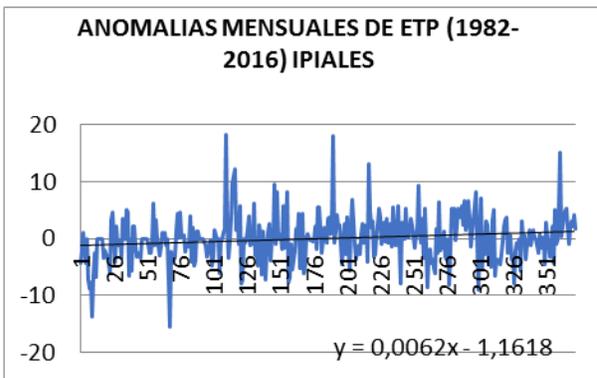
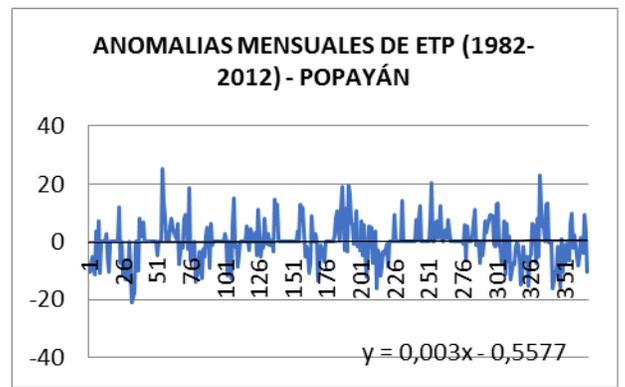
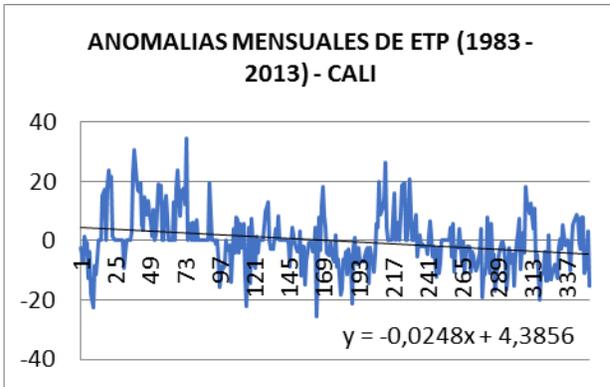
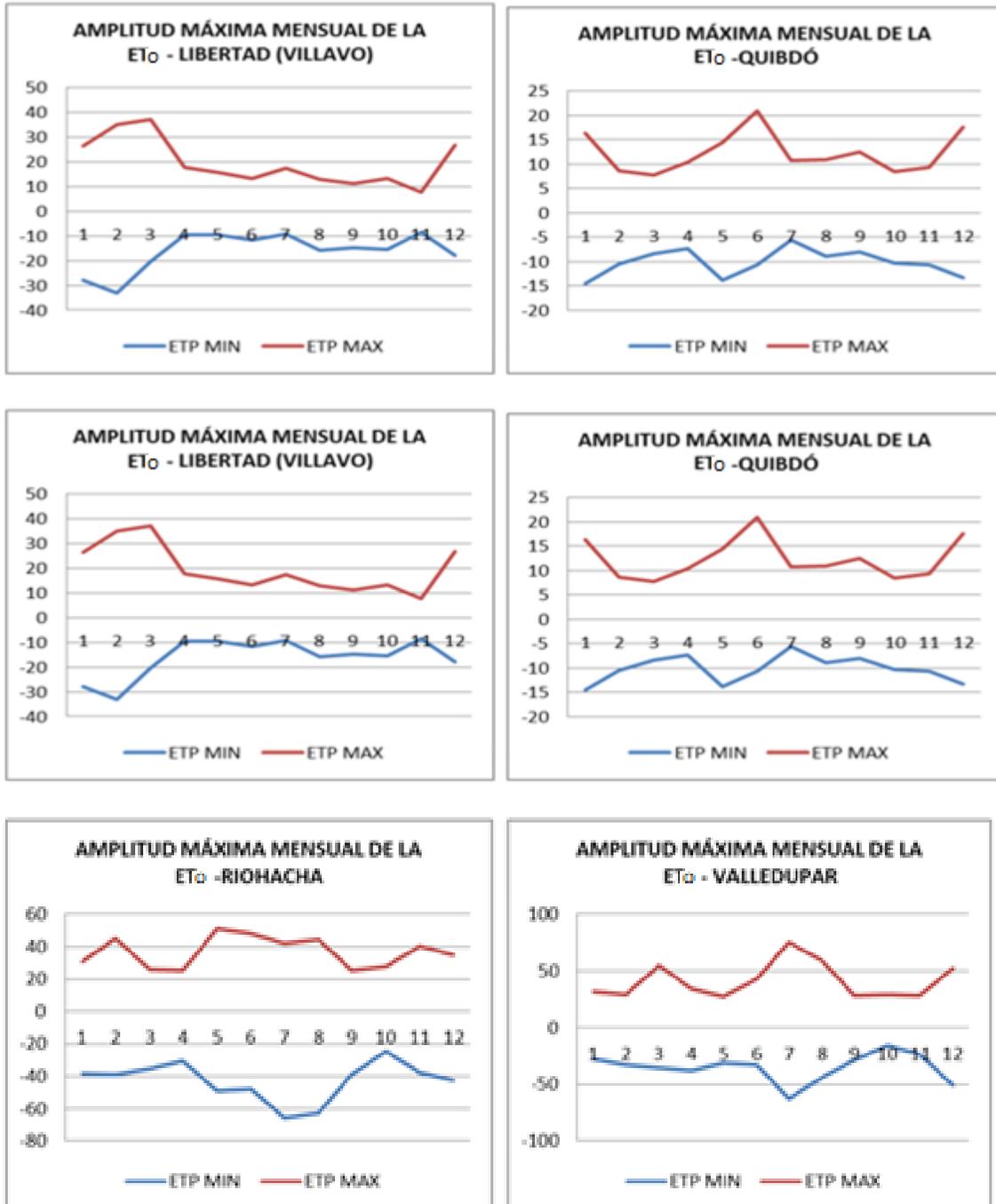


GRAFICO 3. Variabilidad interanual de las anomalías de ETo (b)

2.2 VALORES EXTREMOS DE LAS ANOMALÍAS DE ET_o

Con el fin de establecer el rango de variación de las anomalías de los valores mensuales de ET_o alrededor del promedio, se seleccionó para toda la serie histórica el valor máximo y mínimo de esta anomalía en cada mes. Estos valores aparecen en el GRAFICO 4.



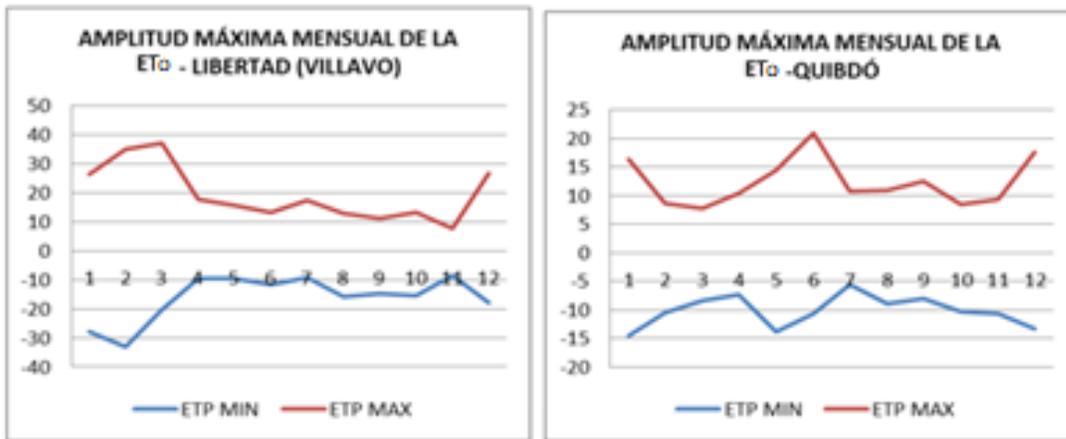
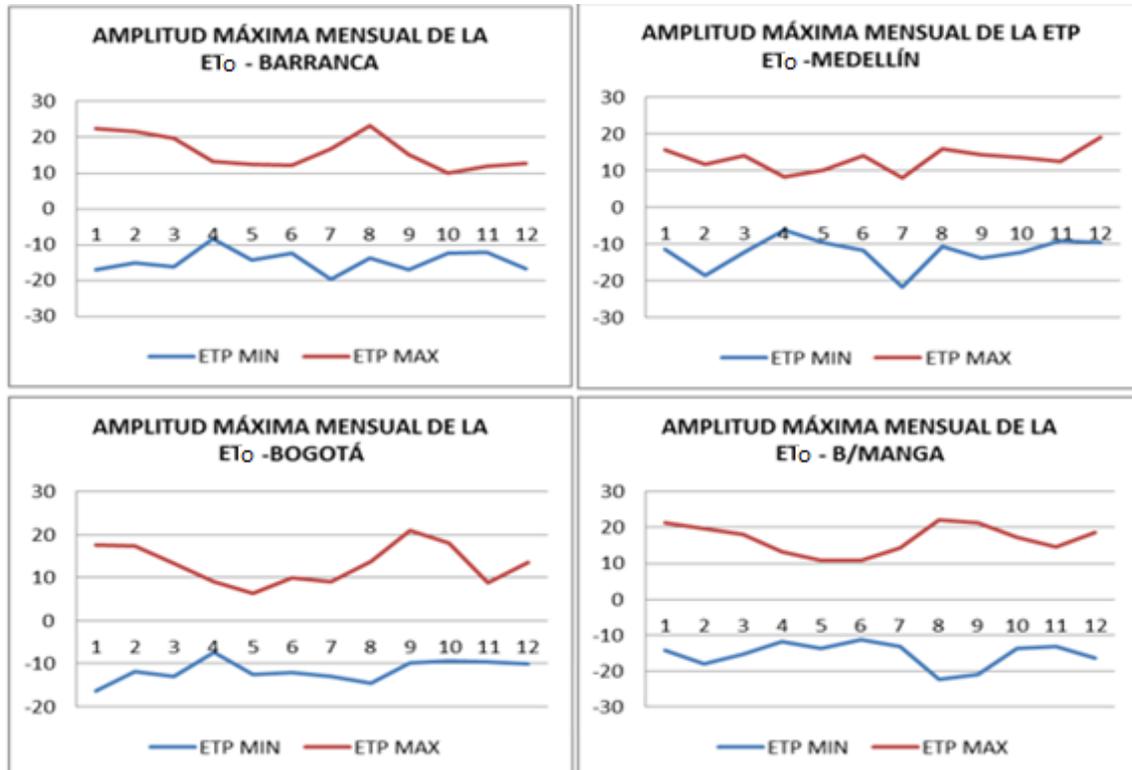


GRAFICO 4. Valores extremos de las anomalías de ETP (a)

Se destacan algunos puntos interesantes. En la región Caribe las variaciones pueden alcanzar valores positivos mayores a los 40 mm/mes. Como es natural, las mayores desviaciones se registran en los meses secos de junio y agosto. Hacia el interior, las anomalías son significativamente menores, especialmente en los regímenes más lluviosos como el medio Magdalena y el medio Cauca, donde las desviaciones no superan los 20 mm/mes. En la región Pacífica, las anomalías generalmente se mantienen alrededor de los 10-15 mm/mes. En el oriente del país las máximas desviaciones ocurren en los meses secos del primer trimestre del año. El resto del año presentan anomalías con valores menores a los 15 mm/mes.



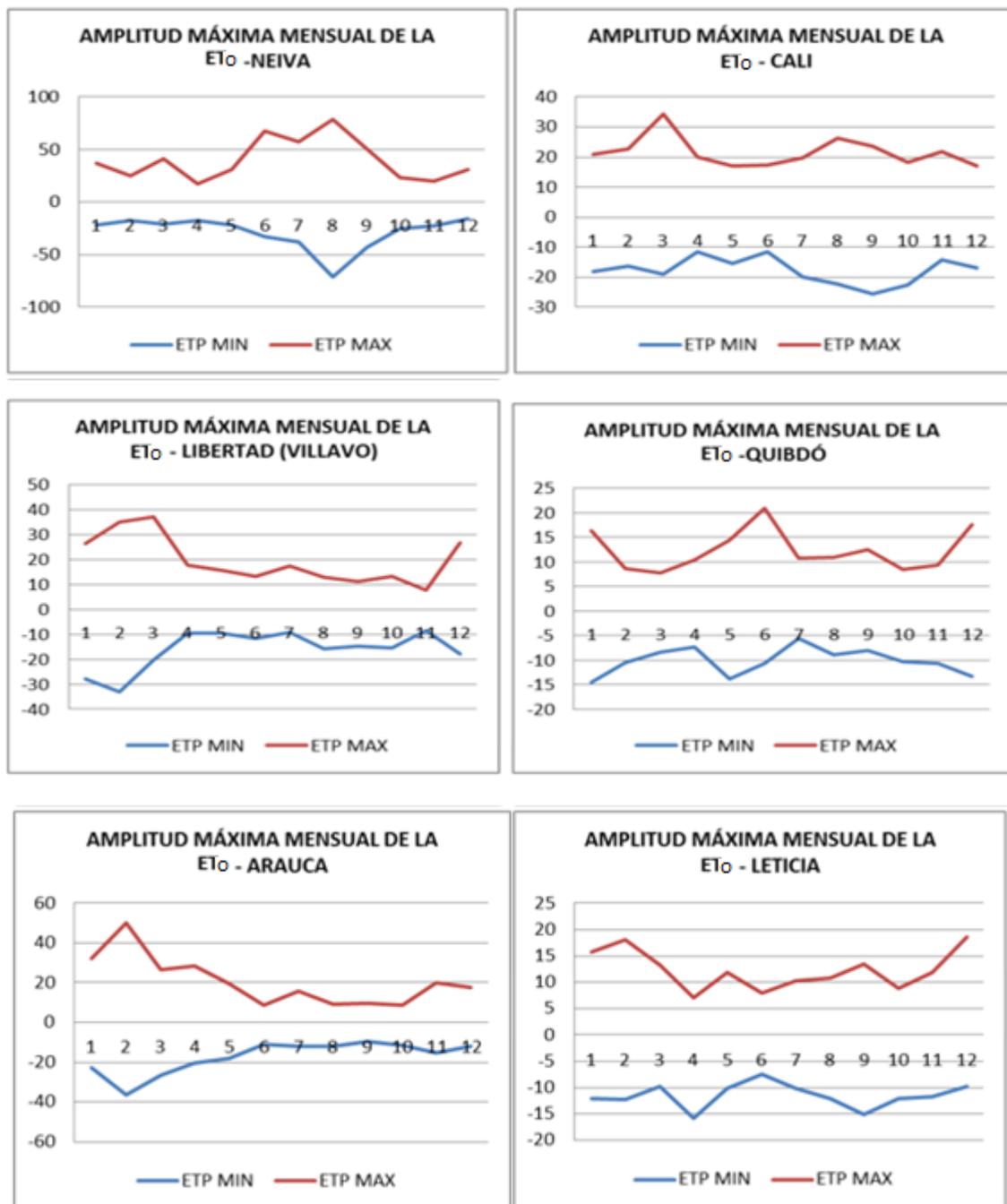


GRAFICO 5. Valores extremos de las anomalías de ETo (b)

Como una forma de caracterizar estas anomalías por medio de indicadores estadísticos, se procedió a calcular los valores de desviación estándar y coeficiente de variación para series históricas de lugares representativos del país. Estos valores aparecen en la Tabla 1. En la mayoría de los casos, se aprecia que la variación de los valores mensuales alrededor del promedio, se sitúa entre un 7 y un 10%, especialmente en lugares localizados en la región Andina. Sin embargo, en climas extremos como Riohacha o Cúcuta, los valores pueden

oscilar alrededor del 15%, lo cual es significativo refiriéndose a valores mensuales, ya que pueden representar hasta 30 mm de desviación en años puntuales.

Tabla 1. Desviación estándar y coeficiente de variación de la ETo (1981-2016)

DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA ETo EN LUGARES REPRESENTATIVOS DEL PAÍS.

NOMBRE		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
QUIBDÓ	estdev (mm)	8,51	7,01	5,04	6,54	8,29	8,87	4,73	6,21	6,31	5,61	6,30	8,61
QUIBDÓ	CV(%)	9,31	7,97	5,11	6,82	8,10	9,23	4,57	5,69	6,17	5,59	6,81	9,68
CARTAGENA	estdev (mm)	8,87	6,78	8,70	8,36	10,38	9,23	9,13	10,19	8,02	7,22	10,58	10,27
CARTAGENA	CV(%)	6,37	4,96	5,55	5,73	7,65	7,10	6,51	7,44	6,37	6,02	9,25	8,11
STA MARTA	estdev (mm)	8,48	7,57	12,21	11,06	12,30	8,26	11,74	11,20	8,22	8,22	9,17	10,18
STA MARTA	CV(%)	5,40	4,76	6,68	6,59	7,80	5,52	7,61	7,42	5,84	6,13	7,28	7,35
RIOHACHA	estdev (mm)	19,06	20,24	17,83	16,16	27,69	26,02	24,95	31,42	16,61	16,21	19,21	20,17
RIOHACHA	CV(%)	11,89	12,75	10,08	9,63	16,33	13,77	11,64	16,13	10,94	11,73	15,22	14,41
CÚCUTA	estdev (mm)	24,63	22,91	17,80	17,64	20,21	26,43	25,90	26,37	26,18	16,16	15,16	22,57
CÚCUTA	CV(%)	19,28	18,80	13,83	13,64	12,84	14,45	12,56	12,40	14,07	10,61	12,41	18,88
NOMBRE		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
NEIVA	estdev (mm)	14,73	10,94	14,04	10,40	11,80	21,75	22,06	28,65	25,24	11,73	9,12	12,00
NEIVA	CV(%)	11,28	9,10	11,09	8,49	9,34	15,93	13,99	16,63	16,18	8,84	8,04	10,14
MOSQUERA	estdev (mm)	6,83	6,45	6,65	3,62	4,46	6,22	4,61	5,94	5,70	5,20	3,95	5,39
MOSQUERA	CV(%)	7,58	7,67	7,23	4,36	5,43	7,97	5,46	6,58	6,47	6,06	5,00	6,28
BOGOTÁ	estdev (mm)	7,84	7,81	6,77	4,66	4,70	5,95	5,24	6,75	6,74	6,32	4,75	6,25

BOGOTÁ	CV(%)	8,34	9,07	7,20	5,51	5,59	7,27	6,02	7,34	7,74	7,39	5,91	7,15
IBAGUÉ	estdev (mm)	13,68	13,22	15,30	6,85	7,54	13,55	17,74	28,86	15,61	10,48	7,38	9,10
IBAGUÉ	CV(%)	11,97	12,45	13,21	6,41	6,92	11,85	13,27	19,14	12,20	9,08	7,53	8,74
RIONEGRO	estdev (mm)	9,25	8,51	8,48	3,97	5,82	7,15	8,17	7,97	9,01	7,08	5,90	6,69
RIONEGRO	CV(%)	9,85	9,42	8,42	4,16	5,77	7,14	7,30	6,88	8,59	7,27	6,83	7,65
BARRANCA	estdev (mm)	10,10	9,75	10,05	6,05	7,06	6,88	8,89	9,96	7,27	6,52	6,39	7,61
BARRANCA	CV(%)	7,66	7,96	7,92	5,18	5,84	5,84	6,71	7,36	5,85	5,61	5,95	6,53
LEBRIJA	estdev (mm)	9,75	8,63	9,04	5,20	5,98	5,68	6,61	10,23	8,60	7,01	7,19	8,51
LEBRIJA	CV(%)	8,62	8,23	8,21	5,04	5,69	5,60	5,95	8,90	7,84	6,74	7,76	8,62
TUNJA	estdev (mm)	6,40	6,48	7,42	5,04	3,49	3,16	2,76	4,71	4,35	4,83	5,44	6,05
TUNJA	CV(%)	6,11	6,56	7,11	5,39	4,01	3,93	3,32	5,29	4,79	5,17	6,22	6,38
POPAYÁN	estdev (mm)	9,73	7,93	6,95	6,47	5,93	7,98	10,13	10,27	10,31	8,48	6,14	9,65
POPAYÁN	CV(%)	10,06	8,79	7,19	7,25	6,65	8,90	9,54	9,51	10,33	9,10	7,21	10,73
NOMBRE		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
PALMIRA	estdev (mm)	11,04	9,84	12,20	8,41	7,84	8,52	11,11	12,13	13,83	9,74	9,77	9,70
PALMIRA	CV(%)	9,60	9,17	10,24	7,84	7,53	8,33	9,71	9,68	11,60	8,56	9,38	9,12
PEREIRA	estdev (mm)	12,45	11,18	9,78	5,86	6,19	6,89	10,14	12,45	10,49	6,98	5,98	9,74
PEREIRA	CV(%)	10,85	10,54	8,35	5,56	6,00	6,84	8,86	10,36	9,42	6,54	6,01	9,17
MEDELLÍN	estdev (mm)	9,89	14,97	13,24	7,44	6,62	12,64	14,28	15,56	12,46	6,52	8,23	6,48

MEDELLÍN	CV(%)	7,79	12,18	9,92	6,24	5,45	10,07	10,27	11,14	9,85	5,56	7,61	5,77
VALLEDUPAR	estdev (mm)	20,10	18,58	25,18	22,44	16,20	20,46	38,47	27,71	15,42	13,54	19,60	25,11
VALLEDUPAR	CV(%)	9,37	8,48	10,40	11,35	10,18	12,86	19,71	15,86	10,36	9,78	14,05	13,71
B/QUILLA	estdev (mm)	9,20	8,93	13,54	13,18	16,95	9,65	13,26	17,57	12,17	8,97	11,92	15,07
B/QUILLA	CV(%)	5,68	5,62	7,39	7,63	10,93	6,76	8,67	11,46	9,21	7,26	9,94	10,77
PTO LÓPEZ	estdev (mm)	13,49	15,73	13,17	7,64	6,00	6,25	7,80	8,74	7,05	6,68	5,28	11,86
PTO LÓPEZ	CV(%)	9,88	12,59	10,78	7,30	5,76	6,72	7,84	7,97	6,19	5,64	4,66	9,62
VILLAVO	estdev (mm)	13,49	15,57	11,21	5,73	6,37	5,08	6,67	7,80	7,00	5,82	7,66	9,83
VILLAVO	CV(%)	11,29	13,81	9,94	5,59	6,36	5,63	7,06	7,33	6,16	5,04	7,37	8,87
ARAUCA	estdev (mm)	11,41	18,59	15,47	13,07	9,40	5,50	7,41	5,77	5,02	6,16	9,79	8,31
ARAUCA	CV(%)	7,92	12,89	10,37	10,75	8,48	5,59	7,18	5,11	4,28	5,07	8,43	6,42
LETICIA	estdev (mm)	8,35	7,14	5,99	4,92	6,45	5,12	5,62	6,84	6,96	5,55	5,87	5,94
LETICIA	CV(%)	7,79	7,31	5,51	4,81	6,75	5,89	5,55	5,97	5,99	4,63	5,26	5,48
NOMBRE		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
PASTO	estdev (mm)	17,06	14,05	9,18	7,54	9,68	12,64	13,93	17,32	17,67	12,14	7,93	9,86
PASTO	CV(%)	16,39	14,54	8,76	7,67	9,29	11,73	10,73	12,23	13,47	10,81	8,40	10,35
IPIALES	estdev (mm)	6,03	5,60	3,00	3,12	3,03	2,61	4,36	4,83	4,76	4,47	4,13	3,92
IPIALES	CV(%)	7,64	7,78	3,84	4,07	4,01	3,74	5,98	6,14	5,94	5,34	5,34	5,06

3. RELACIÓN ENTRE LOS EVENTOS ENOS (EL NIÑO-OSCILACIÓN SUR) Y LOS VALORES MENSUALES DE LA ETo

3.1 METODOLOGÍA

Para establecer una posible relación entre la ocurrencia de los eventos ENOS y la serie histórica de la ETo, se seleccionaron 30 estaciones representativas en diferentes zonas climáticas que contaban con series de largo periodo y con todas las variables necesarias para el cálculo aplicando la ecuación FAO-Penman-Monteith (Tabla 2). El cálculo se realizó con el aplicativo Evapotrans, en la escala mensual para toda la serie histórica disponible.

Se obtuvieron los promedios mensuales de ETo en cada estación y se calculó la anomalía mensual para todos los años de la serie histórica por estación, de acuerdo con la expresión:

$$ANOM(i) = ETo(i) - ETo(prom)$$

ANOM(i): anomalía del mes i

ETo(i): ETo del mes i

ETo(prom): ETo promedio mensual

Se identificaron los períodos El Niño/La Niña, de acuerdo con la metodología de la NOAA, es decir, utilizando el índice Oceanic Niño Index (ONI), como indicador de la presencia de un evento ENOS.¹

Para realizar la caracterización, se seleccionaron seis eventos ENOS (tres eventos cálidos y tres eventos fríos), considerando los que mayor efecto han tenidos sobre las lluvias en el país. En cada uno de estos eventos se analizó el comportamiento de las anomalías de ETo.

¹¹ El ONI (Oceanic Niño Index), es el índice más comúnmente utilizado a escala mundial, para hacer seguimiento de los eventos ENSO. Se define como la media móvil de tres meses, de las anomalías de la temperatura de la superficie del océano en la región Niño 3.4. Un evento cálido (El Niño), se caracteriza por valores del $ONI \geq 0,5^{\circ}C$; un evento frío (La Niña), presenta valores de $ONI \leq -0,5^{\circ}C$. Para un evento sea declarado como plenamente establecido, es necesario que los límites mencionados sean sobrepasados por al menos cinco períodos de tres meses.

Tabla 2. Estaciones de referencia

CODIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ALTITUD	LON	LAT
11045010	Apto El Carano	Quibdo	Choco	53	-76,6438611	5,6905556
14015020	Apto Rafael Nunez	Cartagena	Bolivar	2	-75,5160278	10,44725
15015050	Apto Simon Bolivar	Santa Marta	Magdalena	4	-74,2288889	11,1283333
15065010	Apto A, Padilla	Riohacha	La Guajira	4	-72,9176944	11,5282222
16015010	Apto Camilo Daza	Cucuta	Norte de Santander	250	-72,5091667	7,9302778
17015010	Apto Sesquicentena	San Andres	San Andres	1	-81,7038889	12,5869444
21015030	Parque Arqueologic	San Agustin	Huila	1800	-76,2949722	1,8884722
21115020	Apto Benito Salas	Neiva	Huila	439	-75,2930556	2,94875
21205420	Tibaitata	Mosquera	Cundinamarca	2543	-74,209	4,6914167
21205790	Apto El Dorado	Bogota D,C,	Bogota D,C,	2547	-74,1506667	4,7055833
21245040	Apto Perales	Ibague	Tolima	928	-75,1484167	4,4301111
23085200	Apto J M Cordova	Rionegro	Antioquia	2073	-75,4258889	6,1686389
23155030	Apto Yariguies	Barrancabermeja	Santander	126	-73,8086111	7,0263889
23195130	Apto Palonegro	Lebrija	Santander	1189	-73,1845278	7,1214722
24035130	U P T C	Tunja	Boyaca	2690	-73,3552778	5,5535556
24035170	Tunguavita	Paipa	Boyaca	2470	-73,1163611	5,7459167
26035030	Apto G L Valencia	Popayan	Cauca	1749	-76,6086944	2,4528889
26075010	Palmira Ica	Palmira	Valle del Cauca	1050	-76,3150278	3,5133889
26075040	Apto A Bonilla	Palmira	Valle del Cauca	961	-76,3855833	3,5333333
26135040	Apto Matecana	Pereira	Risaralda	1342	-75,7338611	4,8158611
27015070	Apto Olaya Herrera	Medellin	Antioquia	1490	-75,5889722	6,2206111
28035030	Apto Alfonso Lopez	Valledupar	Cesar	138	-73,2494444	10,4394444
29045020	Apto E Cortisoz	Soledad	Atlantico	14	-74,7797778	10,8833611
35025020	Libertad La	Villavicencio	Meta	336	-73,4679167	4,0573611
35035020	Apto Vanguardia	Villavicencio	Meta	423	-73,6205	4,1634444
37055010	Apto Arauca	Arauca	Arauca	128	-70,7380556	7,0694444
47015100	Encano El	Pasto	Narino	2830	-77,1614722	1,1599444
48015010	Apto Vasquez Cobo	Leticia	Amazonas	84	-69,9409167	-4,1938611
52045020	Apto Antonio Narino	Chachagui	Narino	1816	-77,2908611	1,3940833
52055010	Apto San Luis	Aldana	Narino	2961	-77,67775	0,8570833

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En general, la información disponible es incompleta y cubre solo unos pocos años dentro del período de los últimos 30 años. Con fines de análisis, se revisaron los eventos El Niño 91/92, 2009/10 y 2015/16 y los eventos La Niña 99/2000, 2007/08 y 2010/11. Para proceder al análisis se formaron grupos de 5 o 10 estaciones con información confiable y lo más completa posible, de los eventos estudiados. La respuesta no siempre es clara y directa, pero al analizar en conjunto, se evidencia una tendencia medianamente definida. Esta tendencia, de acuerdo con los resultados, muestra valores de ETo por encima de lo normal durante los eventos El Niño, y por debajo de lo normal en los eventos La Niña. (GRAFICO 6 a GRAFICO 11).

3.2.1 EVENTO EL NIÑO 1991/92

El índice ONI, utilizado por la NOAA como indicador de la ocurrencia de un evento cálido El Niño en la parte oceánica, ya que toma en cuenta la anomalía de la temperatura superficial del mar, comienza a presentar valores positivos y superiores a 0,5, a partir del trimestre abril-mayo-junio de 1991 y se prolonga hasta el trimestre mayo-junio-julio de 1992.

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1

Fuente: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

A pesar de que el evento registró anomalías positivas por encima de 1.0°C y tuvo una gran incidencia sobre las lluvias del país, la ETo no muestra una tendencia definida al comienzo o final del evento. Sin embargo, cuando el índice supera el valor de 1°C, como es el caso del primer semestre del año 92, es claro que los valores de la ETo se conservan por encima de los promedios multianuales. La anomalía puede llegar a superar los 20 mm mensuales, como es el caso de la costa Caribe, aunque en general se conserva entre 0 y 10 mm/mes.

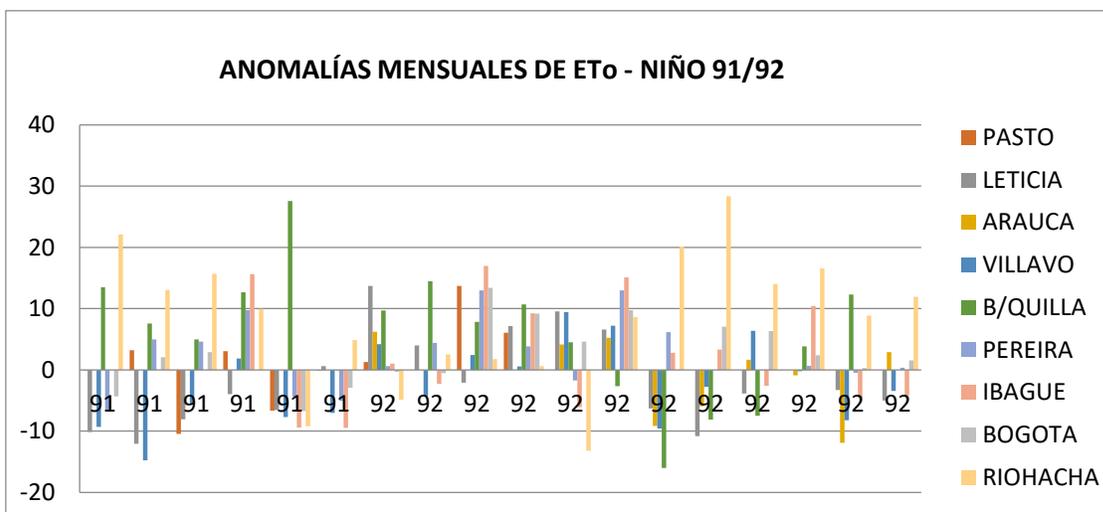


GRAFICO 6. Anomalías de ETo (Periodo El Niño 91/92)

3.2.2 EVENTO EL NIÑO 2009/10

De acuerdo con la serie del índice ONI, el evento cálido comenzó en el trimestre junio-julio-agosto y terminó en el trimestre febrero-marzo-abril del año 2010. El evento fue corto pero intenso y produjo sequía en buena parte del país a finales de 2009 y principios de 2010. Ocurrió entre dos eventos La Niña.

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6

Fuente: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Este evento que también resultó ser intenso, se reflejó directa y claramente sobre el comportamiento de la ETo.

Los valores de ETo, se mantuvieron por encima de lo normal desde el inicio del evento, y solo hacia el último trimestre del periodo, empezaron a disminuir hasta acercarse a los valores normales.

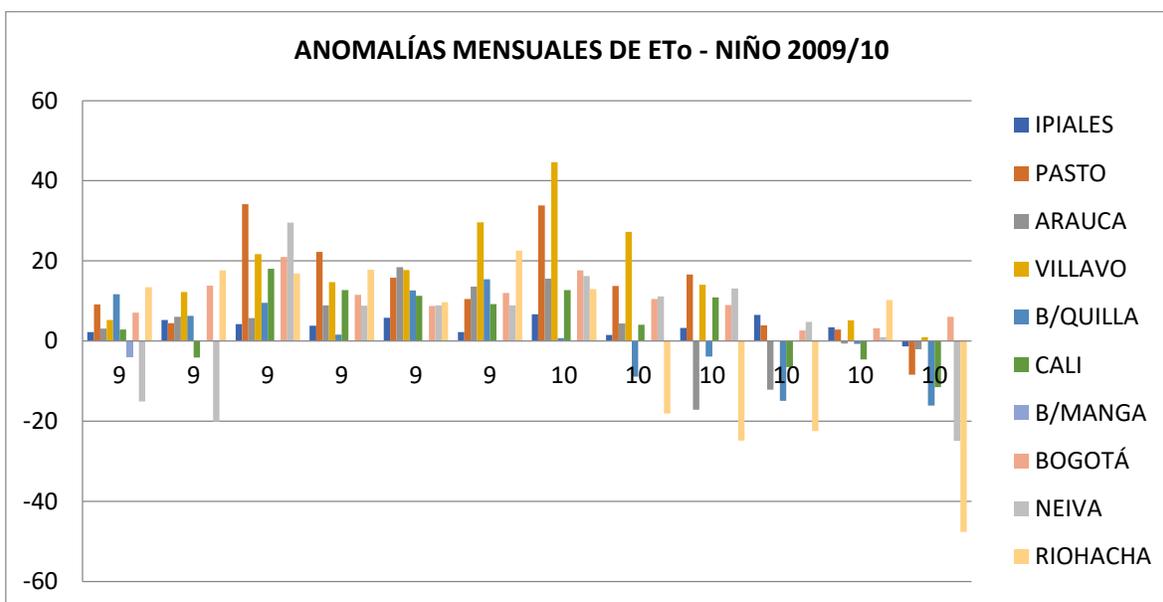


GRAFICO 7. El Niño 2009/10

3.2.3 EVENTO EL NIÑO 2015/16

El evento comenzó a establecerse a finales del año 2014, pero tuvo su máxima intensidad en el segundo semestre de 2015 y primer semestre de 2016. Fue uno de los más intensos ocurridos en Colombia.

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6

El fenómeno Niño 2015/16 es tal vez uno de los más intensos de la historia climatológica reciente. De la misma forma, se aprecia que la ETo presentó una tendencia muy definida al registrar valores por encima de los promedios a lo largo de todo el periodo de ocurrencia, confirmando el comportamiento característico de la variable durante los eventos cálidos.

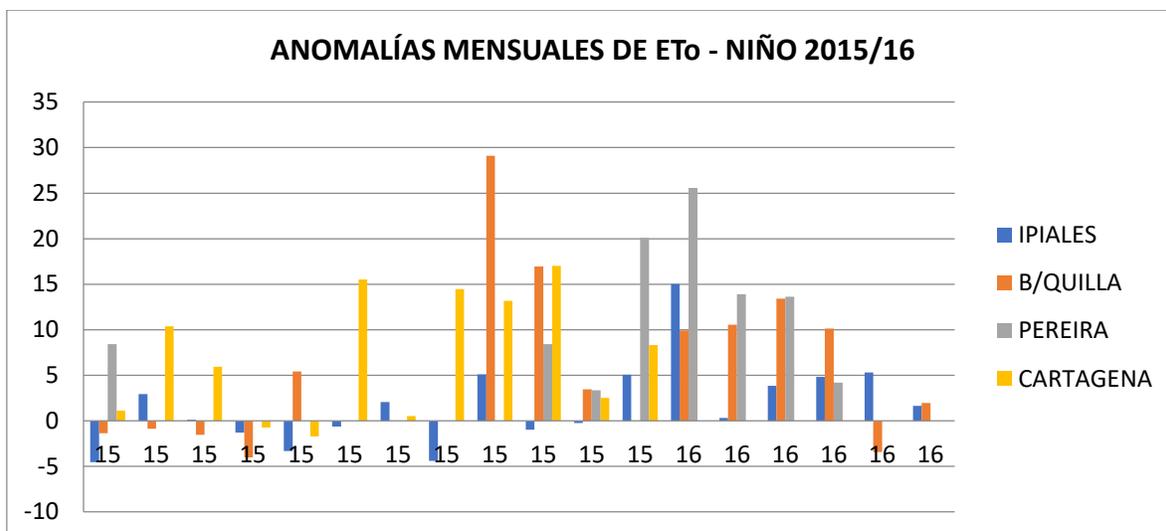


GRAFICO 8. El Niño 2015/16

3.2.4 EVENTO LA NIÑA 1999/2000

Fue uno de los eventos fríos más prolongados. Comenzó en el segundo semestre de 1998 y terminó hacia el primer trimestre de 2001. Su mayor intensidad se observó durante todo el año 99 y principios de 2000.

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7

Se analizó el comportamiento de 9 estaciones representativas de diferentes zonas climáticas y en la mayor parte de ellas se observa tendencia a registrar valores de ETo por debajo de los promedios. Además, se aprecia una estrecha relación entre el valor del ONI y la anomalía de la variable. En los trimestres en los cuales el ONI toma valores más bajos, es posible observar anomalías incluso positivas en algunos casos. Sin embargo, los mayores valores del ONI, siempre están caracterizados por anomalías negativas de la ETo.

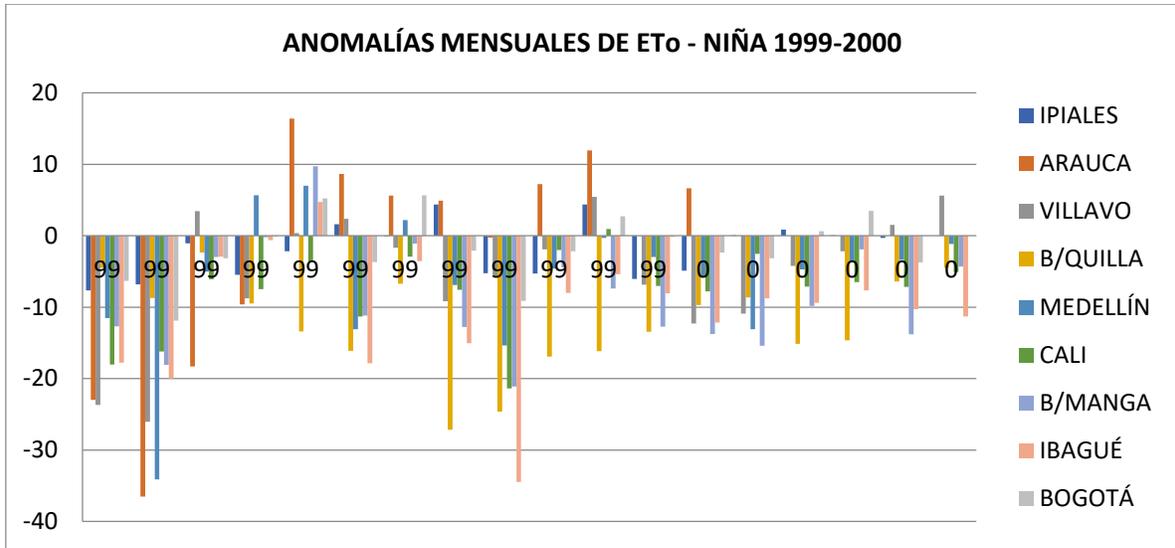


GRAFICO 9. La Niña 1999/2000

3.2.5 EVENTO LA NIÑA 2007/08

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7

Este evento fue relativamente corto, sin embargo, los valores negativos del ONI fueron significativos, especialmente en el último trimestre del 2007 y primer trimestre del 2008. Las 7 estaciones analizadas, muestran una tendencia muy definida hacia valores altos de anomalías negativas de la ETo.

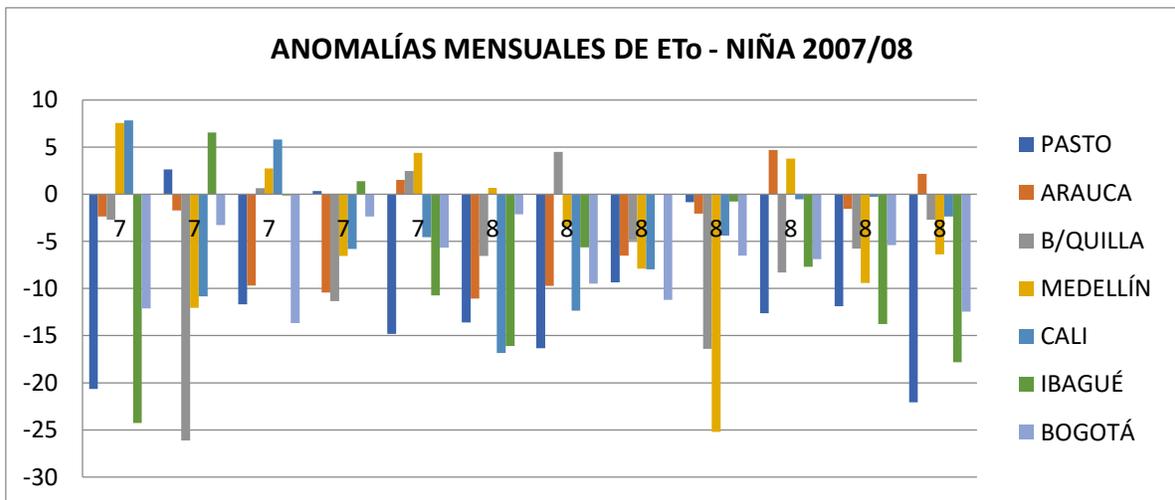


GRAFICO 10. La Niña 2007/2008

3.2.6 EVENTO LA NIÑA 2010/11

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0

El evento de estos años, fue especialmente intenso en cuanto a los efectos que representó en la economía del país, debido a que fue causante de graves inundaciones especialmente en la región Caribe. En las estaciones analizadas, se observa el predominio de los valores de ETo, menores a los promedios, durante casi la totalidad de duración del evento.

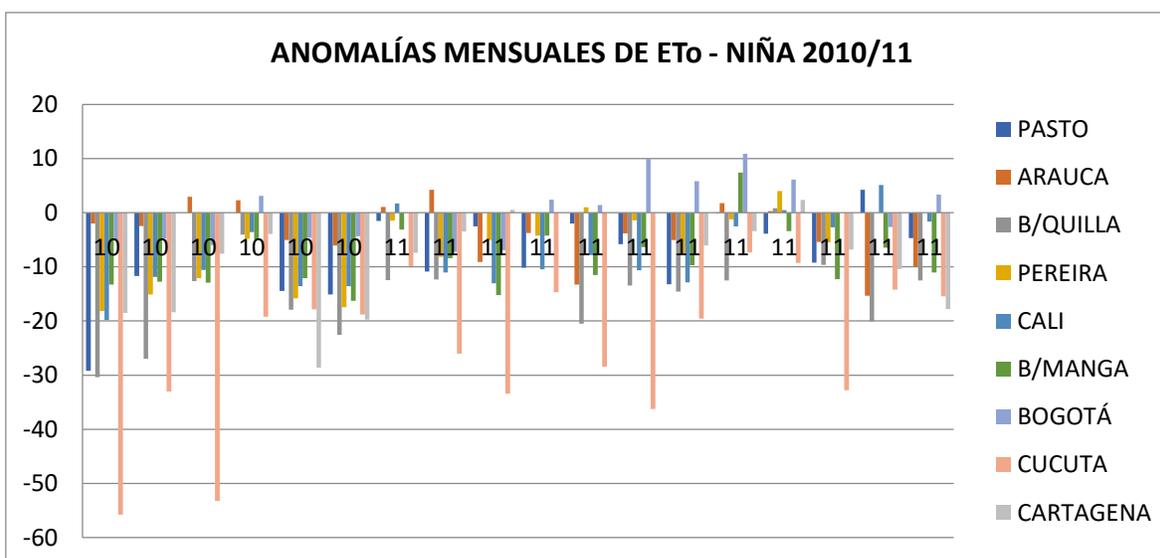


GRAFICO 11. La Niña 2010/11

4. CONCLUSIONES

4.1 CONCLUSIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO CLIMATOLÓGICO DE LA ETo EN COLOMBIA

En cuanto a la marcha anual de la ETo: Generalmente los máximos valores se presentan en las épocas secas y en periodos de mayores lluvias, la ETo desciende hasta alcanzar los rangos más bajos durante el año. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la amplitud anual (diferencia entre el mes con mayor promedio diario y el mes con menor promedio), no supera los dos milímetros. Las mayores diferencias se dan en las localidades más calurosas y secas (Riohacha, Cúcuta) y las menores amplitudes se registran en las regiones de trópico húmedo (Barranca, Quibdó) y también en lugares altos de las cordilleras (Sabana de Bogotá).

En cuanto a la distribución espacial: La distribución anual sigue un patrón más o menos definido: Región Caribe: 1400 a 2000 mm/año; Orinoquia: 1200 a 1600 mm/año; Región Pacífica: 1000 a 1200 mm/año; Amazonia: 1000 a 1200 mm/año; Región Andina: desde 800 en las mayores elevaciones, hasta 1200 en estribaciones bajas.

4.2 CONCLUSIONES AL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA ETo

En cuanto a la variabilidad interanual: la magnitud de las anomalías alrededor de la media, es mayor en los climas cálidos y secos, en comparación con los climas medios y fríos húmedos de la región Andina. En los primeros, es posible registrar anomalías de 30 a 50 mm/mes, mientras en lugares altos de la región Andina como Bogotá, las anomalías son menores a los 20 mm/mes.

En cuanto a tendencias a largo plazo: no se lograron detectar tendencias significativas a largo plazo en la mayoría de los puntos analizados.

En cuanto al coeficiente de variación de las series históricas: Se aprecia que, en la mayoría de los casos, la variación de los valores mensuales alrededor del promedio, se sitúa entre un 7 y un 10%, especialmente en lugares localizados en la región Andina. Sin embargo, en climas extremos como Riohacha o Cúcuta, los valores pueden oscilar alrededor del 15%, lo cual es significativo refiriéndose a valores mensuales.

De acuerdo con lo anterior puede concluirse que en localidades de trópico húmedo o en áreas ubicadas por encima de los 2000 msnm, sin grandes variaciones durante el año (Región Pacífica, Amazonia, altiplanos), podría ser válido trabajar con valores promedio de ETo; sin embargo, en las regiones Caribe, Orinoquia, y en estribaciones bajas y medias de las tres cordilleras, es preferible realizar los cálculos para cada año y mes específico, a riesgo de cometer errores en la demanda hídrica de alrededor del 10 al 15 % por mes.

4.3 CONCLUSIONES AL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS FENÓMENOS EL NIÑO/LANIÑA EN LA ETo

En gran parte de las estaciones analizadas, se observa una estrecha relación entre la presencia de los fenómenos ENOS y la anomalía de la ETo. Los eventos cálidos se caracterizan por anomalías positivas de ETo y por el contrario en eventos fríos, predominan anomalías negativas de la variable. Es más evidente esta condición en el caso de eventos La Niña que en los eventos cálidos El Niño.

En cuanto a la magnitud de las anomalías mensuales, puede afirmarse que en la mayoría de los casos oscilan entre 10 y 20 mm mensuales, lo cual representa una desviación de aproximadamente 5-15%, en comparación con el promedio mensual. Estos valores tienden a ser mayores en estaciones de la región Caribe.

Con relación al balance hídrico, y de acuerdo a los resultados obtenidos, se podría afirmar que en los eventos ENOS, la situación tiende a agravarse en cada caso. En los eventos Niño, la ETo aumenta y la lluvia disminuye, incrementando significativamente la magnitud de las deficiencias de agua. En el caso de los eventos Niña, la ETo disminuye y las lluvias aumentan, y por tanto también se aumenta el nivel de los excesos hídricos. El efecto acumulado de estos dos parámetros puede reflejarse en un aumento de las deficiencias o excesos hídricos, en un 15 a 20%, durante los eventos ENOS, en comparación con los años normales. Sin embargo, estas cifras son apenas una aproximación y deben ser validadas con estudios más detallados.

Bibliografía

Baldión, J. (1985). *La evapotranspiración Potencial*. Bogotá: HIMAT.

Gómez, J. & Cadena, M (2017). *Evaotranspiración de referencia (ETo) para Colombia*. Bogotá: Ideam.

FAO NO.56. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma.

Hurtado, G. (2000). *La ETo en Colombia*. Bogotá: IDEAM.

Palmer, Wayne. (febrero1965). «*Meteorological Drought*». *Research paper no.45, U.S. U.S.:* Department of Commerce Weather Bureau.

Penman, H. L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Londres: Proc.Roy. Soc. .